

G-01

# 遠隔操作型アンドロイド「テレノイド」の遠隔操作とその訓練

## Teleoperation of Telenoid and it's training

中道 大介†† Daisuke Nakamichi      西尾 修一‡ Shuichi Nishio      石黒 浩†† Hiroshi Ishiguro

### 1. はじめに

今日、通信メディアの発達により、電話やEメールなどを通じて遠隔地の相手とコミュニケーションを行うことができるようになった。通信メディアにより、私たちのコミュニケーションはより豊かになったといえる。しかし、現状の通信メディアは主に言語情報を伝達しており、非言語情報を対話者に伝達しにくいという問題がある。また、対話をしていても、直接会っている時のような、相手の存在感を通信メディアから感じ取ることもできない。

この問題を解決するために我々は、遠隔操作型アンドロイドという通信メディアに注目し、アンドロイドの利用による遠隔コミュニケーションへの影響について研究してきた[1]。遠隔操作型アンドロイドは遠隔地の対話者とのコミュニケーションを目的としたロボットである。アンドロイドの身体動作は操作者の身体動作と同期するため、操作者は遠隔地の対話者と身体を用いたコミュニケーションができる。このアンドロイドの中の一つであるテレノイドは、操作者が老若男女誰であっても対話者が操作者を投影できるような中性的な容姿をコンセプトとしたアンドロイドである(図1)。テレノイドは顔を左右対称の大人のような形状にし、体の大きさや頭と体のバランスを子供のようにする事で、性別と年齢を曖昧なものとしている。また、コミュニケーションを目的とするため、コミュニケーションに大きな影響を与えないと考えられる手足の細部等を簡略化している。テレノイドは対話者が抱いてコミュニケーションをとることができ、特に高齢者や認知症の対話者に対しては、対話が促進されるなどの効果が示されている[2][3]。

テレノイドは対話者に効果がある一方で、その操作者に対しては問題が生じている。操作者はアンドロイドを操作することが初めての人が多く、遠隔操作しても操作している実感がなく、身体による操作もできない。そのため、テレノイドを自分の身体のように遠隔操作し、テレノイドを通じて操作者の動作を伝達できるようになるまでに、馴化の時間がかかってしまう人が多いのである。この問題の解決のためには、テレノイドの遠隔操作の要因について検討した上で、操作者の馴化を促進するための効果的な操作訓練の手法を考案する必要がある。

そこで、本研究では操作者がテレノイドを自分の身体のように遠隔操作できるようになるための要因について、テレノイドの自己認識モデルを作成することで考察する。また、テレノイドの操作訓練についても考察し、フィールドワークを実施することで、操作訓練の効果について検証する。

### 2. 遠隔操作システム

テレノイドの遠隔操作システムを図2に示す。このシステムは他の遠隔操作型アンドロイドを用いた身体感覚転移に関する研究[4]と同様のシステムである。

テレノイドは操作者の首と口に同期した動作が可能であ



図1 遠隔操作型アンドロイド「テレノイド」

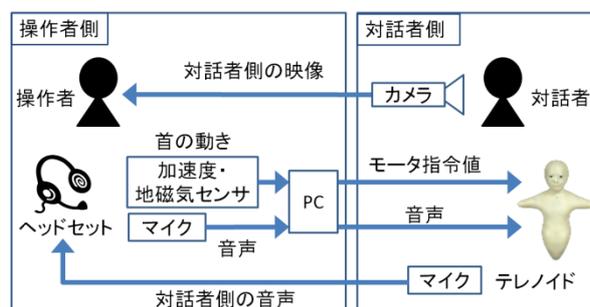


図2: テレノイドの遠隔操作システム

る。操作者の首の動きは装着したヘッドセットに搭載した地磁気、加速度センサで認識し、口の動きは音声から口の形状を推定するシステム[5]で認識する。これより、遅延が300ms内のほぼ同期した動作が可能となる。また、操作者の音声はヘッドセットのマイクから取得してテレノイドの内蔵スピーカで再生し、対話者の音声はテレノイドの付近にあるマイクから取得して操作者のヘッドセットで再生する。

### 3. テレノイドに対する操作者の認識

#### 3.1 テレノイドに対する自己認識モデル

操作者がテレノイドを遠隔操作する場合、テレノイドは操作者の身体動作と同期して動くため、操作者は自分と同じように動くテレノイドを自分の分身のように認識すると考えられる。すなわち、それは操作者がテレノイドの身体を自己の身体と錯覚して認識することであり、そのプロセスは自己認識のプロセスに基づいたものであると考えられる。そこで、Tsakirisらの自己認識モデル[6]を元に、操作者のテレノイドに対する自己認識のモデルを作成した(図3)。

このモデルのプロセスは以下の通りである。身体を運動させる際、運動の意図(Motor Plan)は運動指令(Motor Command)に変換される。そして、運動指令(Motor Command)が操作者の身体動作(Posture Displacement)となり、操作動作による固有感覚(Proprioceptive Afferece)と、操作動作から生成されたテレノイド(Telenoid)の身体動作の視覚情報(Visual Afferece)が比較器に渡る。一方、運動指令に対する遠心性コピー(Efference Copy)が生成され、遠心性コピーの一方は比較器に入力され、もう一方は

†大阪大学基礎工学研究科, Graduate School of Engineering Science, Osaka University

‡国際電気通信基礎技術研究所, ATR

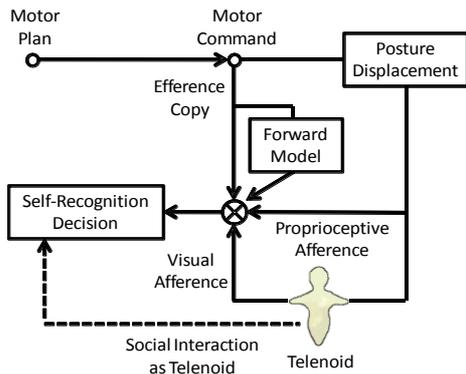


図3: テレノイドに対する自己認識モデル (Tsakirisらのモデル[6]を改変)

フォワードモデル(Forward Model)に入力されて運動の予測情報として出力された後、比較器に入力される。比較器ではこれら入力された情報を比較し、一致した場合にテレノイドの身体を自己の身体として認識する。また一方で、他者と社会的なインタラクションをとること(Social Interaction as Android)でテレノイドとして能動的にふるまったり、受動的に他者からテレノイドとして扱われたりすることでも、テレノイドの身体を自分の身体と概念的に思い込み、自己の身体として認識する。

次節からは、図3のモデルをもとに、テレノイドに対する操作者の認識について考察する。

### 3.2 アンドロイドへの身体感覚転移

図3のモデルでは、比較器において操作者の運動に関する情報(運動指令、固有感覚、運動の予測)と、テレノイドからの視覚情報が一致する必要がある。遠隔操作型アンドロイドであるジェミノイドを用いた研究では、操作者がアンドロイドを自分であるかのように感じる身体感覚転移という現象が知られている。この現象は、操作者が自分と同期して動くアンドロイドを観測することによって起こることが報告されている[7]。これより、テレノイドにおいても、テレノイドを自分の分身のように感じるためには、操作者が自分と同期して動くテレノイドを観測すること、すなわち、図3のモデルで示すように操作者の運動に関する情報とテレノイドからの視覚情報が一致する必要があると考えられる。

### 3.3 テレノイドからの視覚情報

操作者が自分と同期して動くテレノイドを観測することについて、操作者はどのようにテレノイドを観測すれば良いのだろうか。小川らは、ジェミノイドを用いて、アンドロイドを見る視点と、身体感覚転移の関係について検証した[8]。検証の結果、アンドロイドへの身体感覚転移が、一人称視点からアンドロイドとの動作の同期を観測する場合だけでなく、アンドロイドと対面した場合や対面でも鏡のようにアンドロイドと操作者の動作方向が左右反対の場合においてもアンドロイドへの身体感覚転移が起きることを示した。一方、アンドロイドではなく、人間の身体への認識の観点から考えた場合、Collinsらの研究[9]からは、観測する身体の部位と、部位を観測する視点の違いによって、認

識精度に違いがあることが示唆される。小川らの研究では、アンドロイドの腕を見ながら動かすことで検証を行っていたため、アンドロイドの身体が操作者の身体と同様に認識されている場合、アンドロイドの身体で注目する部位によって、視点の影響を受ける可能性が示唆される。

### 3.4 運動と視覚情報の同期性

操作者が自分と同期して動くアンドロイドを観測して操作することについて、運動とその視覚情報の同期はどれくらいまで許容されるのであろうか。渡辺らの研究[7]では、操作者の動作に対してジェミノイドの動作を1秒遅らせた場合、つまり、操作者の動作に対するアンドロイドの視覚情報を1秒遅らせた場合、身体感覚転移は起こらないと報告されている。一方、アンドロイドへの身体感覚転移と同様に別の物体を自分の身体のように錯覚させることで、運動と視覚情報の同期について研究したのものもある。Frankらの研究では、バーチャルの手を用いて、手の運動とその運動の視覚情報の同期を150ミリ秒遅延させると、運動主体感(Agency)を感じないことが報告されている[10]。また、義手が撫でられている様子(視覚刺激)と手が撫でられている感覚(触覚刺激)の受容が同期することで起こると知られている。RHI(Rubber Hand Illusion)[11]では、視覚刺激と触覚刺激の同期の遅延が300ミリ秒までならば、強いRHIが起こることが報告されている[12]。これらの研究より、テレノイドのような別の物体を自分の身体のように錯覚するためには、運動とその視覚情報についての強い同期性が必要であることが分かる。

### 3.5 テレノイドとしての他者との関わり

操作者が自分と同期して動くテレノイドを操作し、他者と社会的なインタラクションをとことは、テレノイドに対する認識にどのような影響を与えるのであろうか。田浦らの研究では、アンドロイドを通じた対話のインタラクションとアンドロイドへの身体感覚転移の関係を検証し、対話相手が見えることで身体感覚転移が強まり、対話相手の返答がある場合、対話相手が見えることで身体感覚転移が強まると報告されている[4]。田浦らの結果から、アンドロイドを通じた対話のインタラクションを行うことで、身体感覚転移が強まることが示唆される。これは、操作者の能動的なアンドロイドとしてのふるまい方と、対話者からの受動的なアンドロイドとしての扱われ方により、操作者がアンドロイドを自分であるかのように認識したのではないかと考えられる。これより、アンドロイドに対する認識が、操作者の運動とアンドロイドの視覚情報の同期によるのみ決まるものでなく、アンドロイドを通じた他者との社会的な関わりあいの中でも決まるのではないかと考えられる。

## 4. テレノイドの操作訓練

### 4.1 道具の使用訓練

テレノイドの操作訓練を行うことによって、どのような効果が得られるのであろうか。訓練によって別の物体を自らの身体かのように錯覚ようになるかどうかを研究した例として、道具の使用訓練に関する研究がある。



図 4: フィールドワークでの遠隔操作システム  
(左: 対話者 右: 操作者)

Maravita らは、視覚刺激が身体付近に提示された場合、別の場所に提示される場合よりも視覚刺激の影響を受けやすいということを利用し、道具の使用訓練によって道具付近の視覚刺激に対する影響を検証した[13]。検証の結果、能動的な道具の使用訓練によって道具付近の視覚刺激に対して身体付近と同様の反応を示すようになり、さらにその反応は使用訓練を繰り返すごとに強まっていくことを示した。同様の効果は、Kao らの研究でも報告されている[14]。また、Cardinali らの研究では、熊手の使用訓練により、知覚する腕の長さが変化することが報告されている[15]。これは、手に持った熊手を自分の身体のように認識することで、手が長くなったと錯覚し、知覚する腕の長さが長くなったと考えられる。

道具の使用訓練に関する研究からは、訓練を行うことによって、道具を身体の一部のように感じる錯覚の効果が強まることを示している。一方、テレノイドの場合、操作者が自分と同期して動くテレノイドを見ることで、テレノイドに乗り移ったような錯覚の効果が得られると考えられる。このように両者には違いがあるが、訓練によって別の物体を自らの身体かのように錯覚するという観点から考えた場合、テレノイドの操作訓練によっても、同様の効果が得られることが示唆される。

## 4.2 テレノイドの操作訓練による効果

テレノイドに対する具体的な操作訓練を行ったフィールドワークをもとに、操作訓練による効果について検証する。

### 4.2.1 手続き

本フィールドワークは大分県の竹田市立城原小学校、豊岡小学校、宮城台小学校に協力して頂き、各小学校の高学年の児童の計 39 名 (男子 14 名, 女子 25 名) が、ロボットの体験学習として参加した。実験では、まず体験学習の概要について説明を受けた後、訓練を行う群 (14 名) と訓練を行わずにレクチャを受ける群 (25 名) に分かれ、それぞれ訓練またはレクチャを行った。訓練の評価は、訓練前後のグループディスカッション(以後 GD)によって行った。GD は 6-7 名の児童らが円陣を組んで座りながら行い (図 4 左)、各グループ一人が操作者となって別室からテレノイドとして参加した(図 4 右)。また、GD のトピックは、操作者が操作するテレノイドと他のグループ員との関わり方が見えるように、吉村の協力的問題過程の分析[16]をもとにしたオープンエンドなものを選んだ。

訓練では、身体を使った理解方法を研究するダンサーの砂連尾理さんに依頼し、ダンサー が考案した内容を 95 分間実施した。一方、レクチャでは訓練との比較を目的として 30 分実施した。レクチャでは、人間らしさ、テレノイドの意味、遠隔操作の方法、テレノイドとの関わり方について説明を受けた。レクチャでは説明のみを行い、テレノイドを触ったり操作したりすることはないようにした。

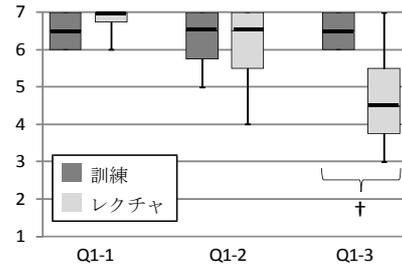


図 5: 操作者の主観評価の結果 (†:  $p < .1$ )

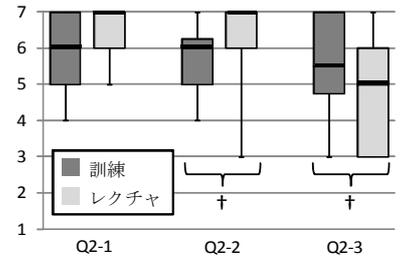


図 6: 対話者の主観評価の結果 (†:  $p < .1$ )

### 4.2.2 評価方法

児童たちにアンケートを行い、操作者と対話者それぞれに GD におけるテレノイドの操作、接し方について主観評価を行った。主観評価では以下の質問を 1 (全くそう思わない) ~ 7 (とてもそう思う) までの 7 件法により評価させた。

[操作者]

- Q1-1: テレノイドを上手く操作できましたか?
- Q1-2: テレノイドは自分の分身のように感じましたか?
- Q1-3: 操作する感覚に変化はありましたか?

[対話者]

- Q2-1: テレノイドと上手く話せましたか?
- Q2-2: テレノイドを操作者の分身のように感じましたか?
- Q2-3: 訓練を受けた子の操作に変化はありましたか?

訓練の効果を見るため、操作者(訓練群: 4 名 レクチャ群 4 名)、対話者(訓練: 10 名 レクチャ: 9 名)について被験者間比較を行った。

### 4.2.3 結果

主観評価の結果の解析として 2 標本ウィルコクソン検定で片側検定を行った。その結果、Q1-3 [ $W = 13, p < .1$ ], Q2-3 [ $W = 104.5, p < .1$ ] において有意傾向が確認され、レクチャ群よりも訓練群の方が操作者は操作する感覚に変化を感じ、対話者は訓練を受けた操作者に対して操作の変化を感じたことが分かった。一方、Q2-2 においても有意傾向 [ $W = 54.5, p < .1$ ] が確認され、訓練群よりもレクチャ群の方が対話者がテレノイドを操作者の分身のように感じたことが分かった。ここで、図 5 と図 6 は操作者、対話者のそれぞれの質問の評価値を表す箱ひげ図であり、箱中の太い横線が中央値、箱の上枠が第 3 四分位点で下枠が第 1 四分位点、箱の上に伸びる縦線の先端が最大値、箱の下に伸びる縦線の先端が最小値を示している。

次に、GD 時の操作者の様子について観察されたことを述べる。操作者のふるまいについては、訓練前はともに発言と動きの連動性がなかったのだが、訓練後は訓練群のみ、対話者への反応として「うん」の相槌と頷き動作の連動が見られた（4名中2名）。また、テレノイドの動かし方については、訓練前はともにテレノイドとの首の動きの同期を確かめる動きが多かったが、訓練後はともにさらにその動きが増加し、対話者を意識した動き、特に頷きの動きが見られるようになった（訓練群: 4名中3名 レクチャ群: 4名中2名）。また、訓練後はともにテレノイドの首の動かし方も変化し、テレノイドと自分の首の動きの差異に気づいて、テレノイドの首の動きが対話者に伝わるように自分の首を大きく動かすようになった（訓練群: 4名中3名 レクチャ群: 4名中1名）。

#### 4.2.4 考察

主観評価の結果より、訓練群はレクチャ群よりも操作者と対話者が操作者に対してより操作に変化を感じたという傾向があり、訓練によってテレノイドの操作に変化が起こったことが考えられる。そしてそれは操作者の様子の変化にも表れており、操作者の発言と動きの連動性、対話者を意識した相槌やテレノイドの動きに合わせた動きが、訓練群において多く見られた。一方で、対話者は訓練をしない方がテレノイドをより操作者の分身として感じたという結果も得られた。これは理由の一つに、訓練群では機械の不具合が生じてしまったため、対話者がテレノイドに対して機械の印象を強く持ったからであると考えられる。また、別の理由として、訓練群では対話者もテレノイドを操作していたため、自分が操作したテレノイドを別の人間が操作することに対して違和感を持ったからではないかとも考えられる。

## 5. 結論

本研究では操作者がテレノイドを自分の身体のように遠隔操作できるようになるための要因について、テレノイドの自己認識モデルを作成することで考察した。また、テレノイドの操作訓練についても考察し、フィールドワークを実施することで、操作訓練の効果について検証した。今後の研究では、操作者がテレノイドを自分のように感じた上で対話者に何を伝え、何をすることができるようになれば、より豊かなコミュニケーションが可能となるかについて、その訓練手法とともに検証していく。

## 謝辞

本研究のフィールドワークを行うにあたり、訓練手法の考案に尽力していただいたダンサーの砂連尾理さんに深く感謝する。また、本研究の一部はJST, CREST, JSPS科研費24650114, 24300200 の助成により行われた。

## 参考文献

[1] 西尾修一, 石黒浩, “人として人とつながるロボット研究,” 電子情報通信学会学会誌, vol. 91, no. 5, pp. 411–416, May 2008.

[2] K. Ogawa, S. Nishio, K. Koda, G. Balistreri, T. Watanabe, and H. Ishiguro, “Exploring the Natural Reaction of Young and Aged Person with Telenoid in a Real World,” *J. Adv. Comput. Intell. Intell. Informatics*, vol. 15, no. 5, pp. 592–597, Jul. 2011.

[3] R. Yamazaki, S. Nishio, K. Ogawa, and H. Ishiguro, “Teleoperated android as an embodied communication medium: A case study with demented elderlies in a care facility,” in *RO-MAN, 2012 IEEE*, 2012, pp. 1066–1071.

[4] 田浦康一, 住岡英信, 西尾修一, 石黒浩, “遠隔操作アンドロイドへの身体感覚転移における対話の影響,” *HAI シンポジウム*, 京都工芸繊維大学, 2012, pp. 2C–3.

[5] C. T. Ishi, C. Liu, H. Ishiguro, and N. Hagita, “Evaluation of formant-based lip motion generation in tele-operated humanoid robots,” in *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS 2012)*, Vilamoura, Algarve, Portugal, 2012, pp. 2377–2382.

[6] M. Tsakiris, P. Haggard, N. Franck, N. Mainy, and A. Sirigu, “A specific role for efferent information in self-recognition,” *Cognition*, vol. 96, no. 3, pp. 215–231, Jul. 2005.

[7] 渡辺哲矢, 西尾修一, 小川浩平, 石黒浩, “遠隔操作によるアンドロイドへの身体感覚の転移,” 電子情報通信学会論文誌, vol. J94-D, no. 1, pp. 86–93, Jan. 2011.

[8] K. Ogawa, K. Taura, S. Nishio, and H. Ishiguro, “Effect of perspective change in body ownership transfer to teleoperated android robot,” in *IEEE International Symposium on Robot and Human Interactive Communication (RO-MAN)*, Paris, France, 2012, pp. 1072–1077.

[9] J. K. Collins, “Self-recognition of the body and its parts during late adolescence,” *J. Youth Adolesc.*, vol. 10, no. 3, pp. 243–254, 1981.

[10] N. Franck, C. Farrer, N. Georgieff, M. Marie-Cardine, J. Daléry, T. d’Amato, and M. Jeannerod, “Defective recognition of one’s own actions in patients with schizophrenia,” *Am. J. Psychiatry*, vol. 158, no. 3, pp. 454–459, 2001.

[11] M. Botvinick and J. Cohen, “Rubber hands’ feel’ touch that eyes see,” *Nature*, vol. 391, no. 6669, pp. 756–756, 1998.

[12] S. Shimada, K. Fukuda, and K. Hiraki, “Rubber Hand Illusion under Delayed Visual Feedback,” *Plos One*, vol. 4, no. 7, p. e6185, Jul. 2009.

[13] A. Maravita, C. Spence, S. Kennett, and J. Driver, “Tool-use changes multimodal spatial interactions between vision and touch in normal humans,” *Cognition*, vol. 83, no. 2, pp. B25–B34, 2002.

[14] K.-L. C. Kao and M. A. Goodale, “Enhanced detection of visual targets on the hand and familiar tools,” *Neuropsychologia*, vol. 47, no. 12, pp. 2454–2463, Oct. 2009.

[15] L. Cardinali, F. Frassinetti, C. Brozzoli, C. Urquizar, A. C. Roy, and A. Farnè, “Tool-use induces morphological updating of the body schema,” *Curr. Biol.*, vol. 19, no. 12, pp. R478–R479, 2009.

[16] 吉村直道, “学習者たちだけによる協力的問題解決過程の分析: 数学的な問題に対する解決過程に注目して,” 愛媛大学教育学部紀要, vol.58, pp.87-94, 2011.